МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 536.248.2.001.24 DOI 10.12737/10374

Исследование критической плотности теплового потока при квазистационарном нагреве поверхностно кипящих бинарных смесей*

В. В. Кожокару[1], Е. В. Лыков[2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on critical heat flux density at the quasi-stationary heating of superficially boiling binary mixtures ***

V.V. Kozhokaru[1], E.V. Lykov[2]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Измерены плотность теплового потока и температура нагревателя одновременно при различных недогревах жидкости до точки кипения. В экспериментах применен квазистационарный метод нагрева, благодаря которому можно точно зафиксировать критическую плотность теплового потока ($q_{кр}$) и температуру нагревателя ($T_{ст}$). На основании экспериментального изучения поверхностного кипения определено, что критическая плотность теплового потока значительно зависит от недогрева жидкости. При температуре ядра жидкости $T_я$= 30 ^{0}C в смеси вода-*n*-бутанол 10 % критическая плотность теплового потока достигает значительной величины 20,68 МВт/м^2, а при $T_я$=90 ^{0}C в разы меньшей $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2. Это связано с увеличением температурного напора (ΔT=$T_{ст\ кр}$+$T_я$) в момент возникновения $q_{кр}$.

Ключевые слова: поверхностное кипение смесей, критическая плотность теплового потока ($q_{кр}$), температурный напор (ΔT).

The heat-flow rate and temperature of the heater are measured at various liquid subcooling boiling points. An experimental plant and the obtained results on the heat energy motion in the superficially boiling binary liquid mixtures are described. The experiments have used a quasi-stationary heating method which allows accurate specifying of the critical heat flux (q_{kr}) and the temperature of the heater (T_h).
An experimental study of the superficial boiling has determined that the critical heat flux density depends significantly on the liquid subcooling. At the liquid nucleus temperature T_L=30 ^{0}C in the mixture of water-*n*-butanol, 10% critical heat flux reaches a considerable size of 20.68 MW/m^2, and at T_L=30 ^{0}C – much less q_{kr}=2.98 MW/m^2. This is due to the increase in the temperature drop (ΔT =$T_{h\ kr}$+T_L) at the moment of q_{kr}.

Keywords: superficial boiling of mixtures, critical heat flux (q_{kr}), temperature drop (ΔT).

Введение. Значительно увеличить производство электрической энергии возможно только за счет строительства или модернизации тепловых электростанций [1]. Все тепловые электростанции работают по циклу Ренкина, где в качестве рабочего тела можно использовать только пар. Большое количество пара получают при кипении, поэтому изучение процесса кипения представляет научный и практический интерес.

При нагреве кипящей жидкости обнаруживается критическая (максимальная) плотность теплового потока $q_{кр}$ [2], которая соответствует максимальной скорости пара, отходящего от поверхности нагрева. Цель работы — определить величину $q_{кр}$ и $T_{ст\ кр}$ при различных недогревах ядра жидкости.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Подвод тепла в жидкость осуществлялся от медной проволоки-нагревателя *d*=50 мкм, длиной 49,5 мм. В качестве тепловыделяющего элемента проволока выбрана неслучайно, т.к. достоверные данные по $q_{кр}$ можно получить только при кипении на достаточно нагретой проволоке [3]. Нагреватель крепился на стержни 8х8 мм с помощью специальных держателей, которые обеспечивали надежное соединение без падения напряжения. От аккумуляторных батарей на стержни через регулятор тока (1) поступала электрическая мощность. Регулятор тока выполнен на базе транзисторов TIP 3055. Для поддержания постоянной температуры радиоэлементов регулятор тока был собран на радиаторе с принудительным воздушным охлаждением. Ток *I* и паде-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: kogokary@rambler.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ние напряжения на проволоке *U* измерялось с помощью цифровых мультиметров и токовых клешей *APPA*. Данные сохранялись на ЭВМ с частотой 0,5 с.

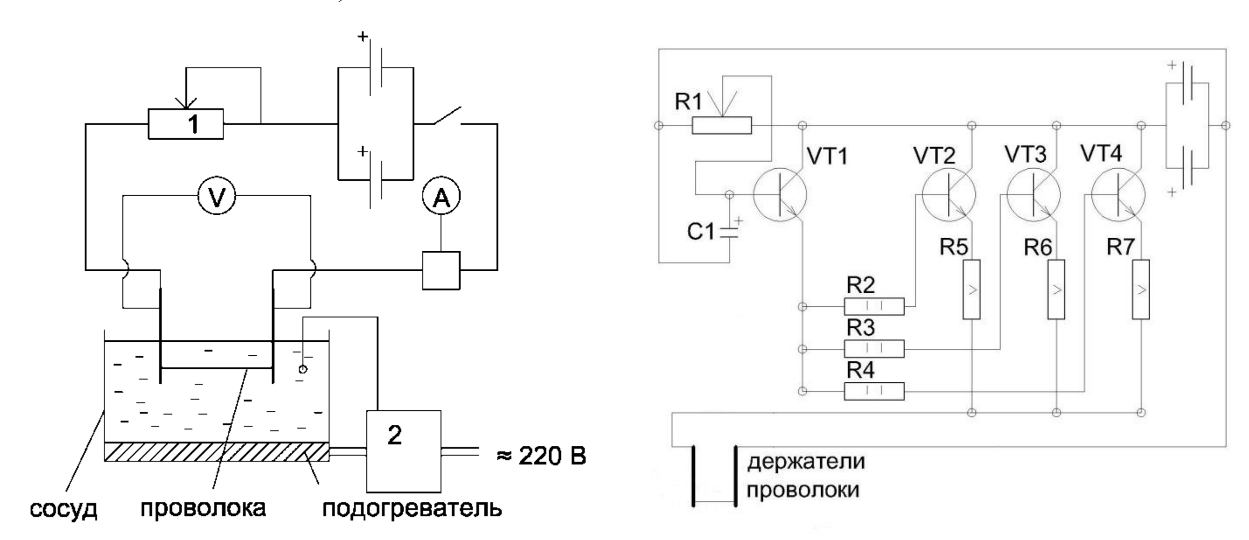


Рис.1. Экспериментальная установка. Слева — схема установки,
справа — принципиальная схема регулятора тока

Стеклянный сосуд, в котором кипела исследуемая жидкость, представлял собой цилиндр объемом 150 мл. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода дистиллированная техническая ГОСТ 6709-72, этанол «Люкс» ГОСТ 30536-97, *n*-бутанол чистый для анализов ГОСТ 6006-78 и их смеси. Температура ядра жидкости $T_я$ фиксировалась с помощью ртутного термометра ТЛ-2. Для поддержания заданной $T_я$ использовался прецизионный термостат (2) с внешним подогревателем.

Перед проведением опыта проволока обязательно прокаливалась при пропускании через нее постоянного электрического тока в воздушной среде. Температура прокаливания должна превышать максимальную температуру предстоящих измерений для того, чтобы устранить механические неоднородности в проволоке, оказывающие влияние на термоэлектрические свойства термометра сопротивления. Такой особый метод обработки проволоки мы назвали кондиционированием [4]. В опытах без предварительного кондиционирования проволоки не удавалось получить хорошей статистики.

Нагреватель погружался в жидкость на 1 см от поверхности жидкости и служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Средняя температура поверхности проволоки определялась по ранее полученной градуировочной кривой зависимости температуры проволоки от сопротивления проволоки.

Установка обеспечивала квазистатический метод нагрева, т. е. по мере увеличения температуры нагревателя $T_{ст}$ устанавливались постоянные температура пристеночного слоя, плотность теплового потока и количество центров парообразования. Регулятор тока давал возможность плавного увеличения $T_{ст}$.

Кривая кипения. На установке получена кривая кипения (рис. 2) в *n*-бутаноле при температуре ядра жидкости $T_я$=117 ^{0}С на медной проволоке-нагревателе *d*=50 мкм при квазистационарном нагреве. Кривой кипения называют зависимость плотности теплового потока от температуры нагревателя при кипении жидкости.

При нагреве от $T_{ст}$=117 ^{0}С до 125 ^{0}С (на рис. 2 точка А) в жидкости наблюдается конвекция кипящей жидкости. В этом диапазоне температур поток тепловой энергии от нагретой стенки к жидкости незначительный, q< 0,05 МВт/м^2. При дальнейшем квазистанионарном увеличении температуры нагревателя ($T_{ст}$=125 ^{0}С) происходит вскипание жидкости. В области 125<$T_{ст}$<157 ^{0}С пузырьковое кипение развивается, при этом очень интенсивно возрастает величина q (с 0,05 до 0,71 МВт/м^2). В 1-бутаноле начало кризиса кипения (на рис. 2 точка Б) наступает при величине $q_{кр}$=0,71 МВт/м^2 и $T_{ст\ кр}$=157 ^{0}С. С дальнейшим увеличением $T_{ст}$>$T_{ст\ кр}$ плотность теплового потока q по каким-то причинам не увеличивается. По-видимому, в этой точке на плотность потока энергии жидкость накладывает ограничения. При этом происходит смена режима кипения [5]. В точке Г плотность теплового потока q возобновляет свой рост, вплоть до расплавления нагревателя.

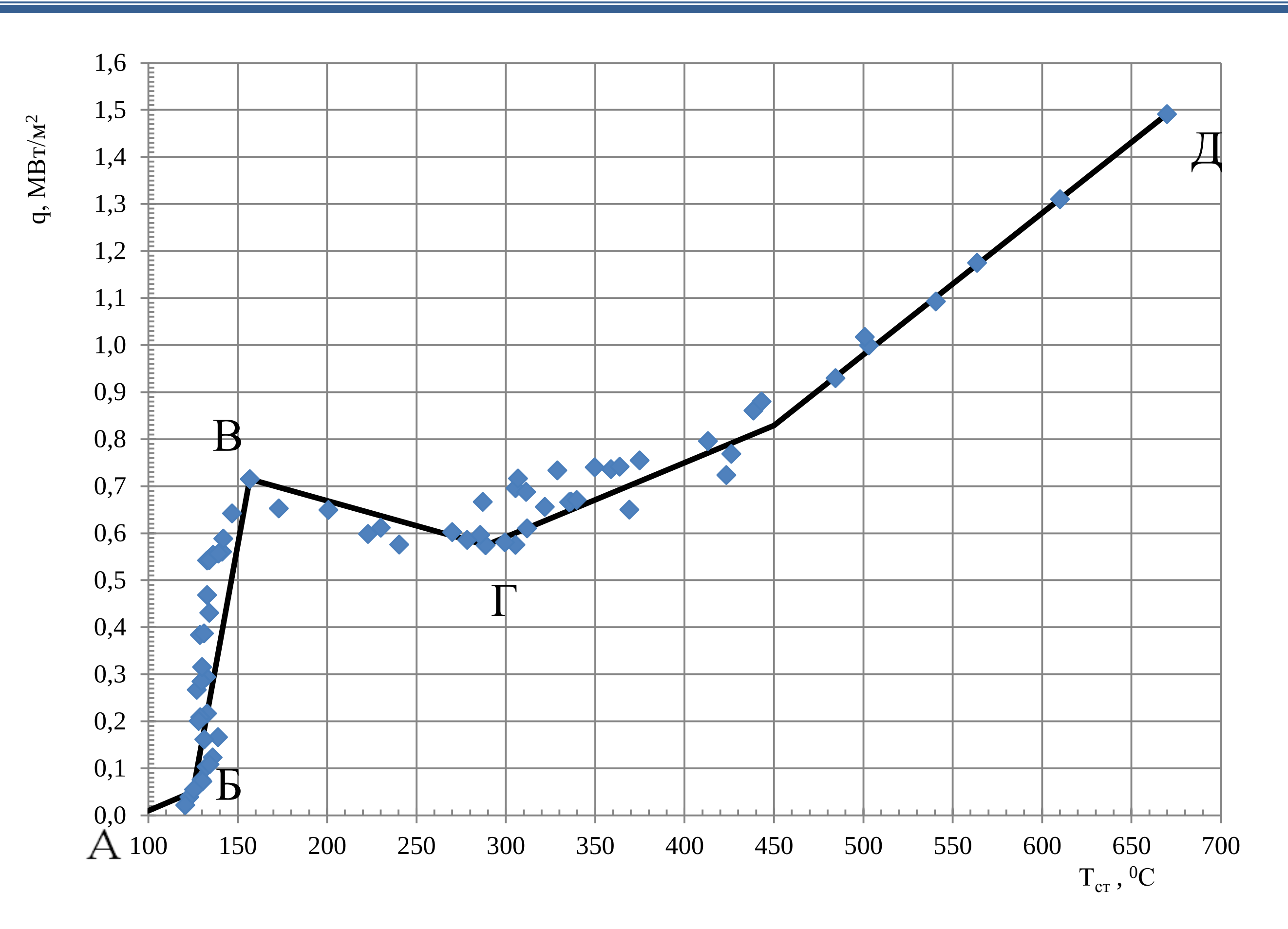


Рис. 2. Кривая кипения при поверхностном насыщенном кипении *n*-бутанола
Кривая кипения описывается уравнением Ньютона – Рихмана

$$q=\alpha\cdot\Delta T=\alpha\cdot(T_{ст}- T_{я}), \qquad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; $T_{ст}$ — температура поверхности нагрева; $T_{я}=const$ температура жидкости при насыщенном кипении.

В уравнении (1) α зависит от $T_{ст}$. В экспериментах по насыщенному кипению измеряют q, $T_{ст}$ и $T_{я}$, а затем вычисляют α. При кипении воды на платиновой проволоке-нагревателе d=200 мкм по данным Ван Стралена [6] $q_{кр}$=0,7 МВт/м^2, $T_{ст\ кр}$=121 ^{0}С, $\alpha_{кр}$=33,3 кВт/Км^2.

Обсуждение результатов. На описанной экспериментальной установке получены кривые кипения в смеси вода-этанол 20 % по массе этанола и вода-*n*-бутанол 10 % по массе *n*-бутанола при $30<T_{я}<90$ ^{0}С. Каждая кривая кипения была получена по результатам трех реализаций кривой кипения. По кривой кипения определены $q_{кр}$ и $T_{ст\ кр}$. Зависимости $q_{кр}$ от $T_{я}$ в двух исследуемых нами смесях приведены на рис. 3. На рис. 4 представлены результаты по определнию $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_{я}$ в смесях вода-этанол 20 % по массе и вода-*n*-бутанол 10 %. Каждая точка на графике есть результат обработки кривой кипения, полученной при заданных условиях.

По результатам экспериментов $q_{кр}$ зависит от температуры ядра жидкости. При кипении смеси вода-этанол 20 % при $T_{я}$=30 ^{0}С, $q_{кр}$=21,97 МВт/м^2, а при $T_{я}$=80 ^{0}С, $q_{кр}$=4,88 МВт/м^2. В смеси вода-*n*-бутанол 10 % при $T_{я}$=70 ^{0}С, $q_{кр}$=13,82 МВт/м^2, а при $T_{я}$=90 ^{0}С, $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2.

Для определения максимального коэффициента теплоотдачи при ненасыщенном кипении уравнения (1) можно записать:

$$\alpha_{кр}= q_{кр}/(T_{ст\ кр}-T_{я}). \qquad (2)$$

Рассчитав значения $\alpha_{кр}$ по формуле (2) получим, что в диапазоне температур $T_{я}$ от 30 до 90 ^{0}С в смеси вода-*n*-бутанол 10 % величина $\alpha_{кр}$ увеличивается от 71,7 до 191,2 кВт/К м^2, а в смеси вода-этанол 20 % от 81,1 до 182,5 кВт/Км^2, т.е. увеличивается более чем в 2 раза.

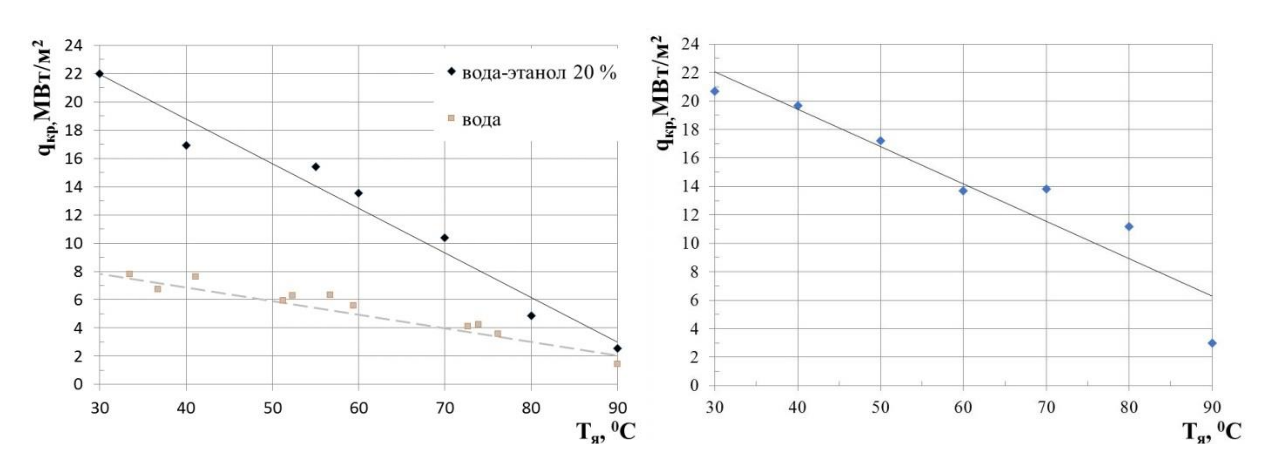


Рис. 3. Зависимость $q_{кр}$ от $T_я$, слева — в смеси вода-этанол 20 % по массе и воды по данным Ван Стралена [7], справа — в смеси вода-*n*-бутанол 10 % по массе

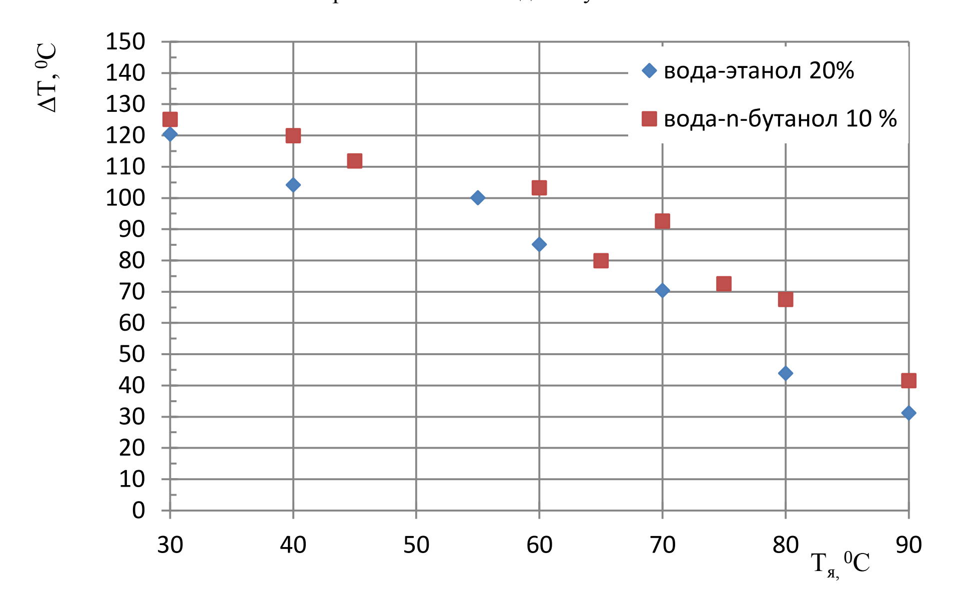


Рис. 4. Зависимость $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_я$ от $T_я$

Из рис. 3 и 4 прослеживается связь между $q_{кр}$ и ΔT. Если в жидкости можно достичь большего значения ΔT, то в ней будет наблюдаться более высокое значение $q_{кр}$.

Из уравнения Лапласа, получим следующее уравнение [9]:

$$r_0 \sim 2\sigma/p'\Delta T, \quad (3)$$

где r_0 — радиус кривизны наименьшего из действующих центров парообразования; σ — поверхностное натяжение; p' — производная давления.

С увеличением ΔT уменьшается r_0, что способствует увеличению количества центров парообразования на поверхности нагрева. Увеличение количества центров парообразования при уменьшении $T_я$ так же подтверждается нашими наблюдениями и наблюдениями, представленными в работе [9].

На центрах парообразования происходит интенсивное выделение тепловой энергии по сравнению с остальной поверхностью нагрева, которая покрыта жидкостью. Ведь для превращения 1 г воды при $T_я$=110 °C в пар необходимо затратить порядка 2229,7 Дж, а для нагрева 1 г при той же температуре воды на 1 °C всего 4,217 Дж [10]. Увеличение центров парообразования на поверхности нагрева способствует повышению плотности теплового потока q. Таким образом увеличение $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_я$ приводит к возрастанию $q_{кр}$.

Плотности теплового потока более 0,5 МВт/м^2 труднодостижимы в технике. Так на ТЭНах возможно достичь плотность теплового потока порядка 0,03–0,4 МВт/м^2, на тепловых трубах новой конструкции 0,1–0,2 МВт/м^2, в современных тепловых котлах 0,2–0,3 МВт/м^2. Максимально достижимые плотности теплового потока на ТВЭЛе атомных реакторов 2 МВт/м^2. Планируемый тепловой поток через стенку вакуумной камеры в термоядерных реакторах типа Токамак может достичь плотности теплового потока 1–10 МВт/м^2 [11]. Во всех этих теплообменных установках используют воду. Замена теплоносителя, например, на смесь вода-этанол 20 % повысит тепловой поток, отходящий от нагревателя в несколько раз.

Выводы:

1. Критическая плотность теплового потока $q_{кр}$ существенно зависит от температуры ядра жидкости $T_я$. В смеси вода-этанол 20 % и вода-*n*-бутанол 10 % значения $q_{кр}$ всегда выше, чем в воде. При $T_я$=30 ^{0}С в смеси вода-этанол 20 % экспериментально получено $q_{кр}$=21,97 МВт/м^2, при $T_я$=80 ^{0}С, $q_{кр}$=4,88 МВт/м^2, в смеси вода-*n*-бутанол 10 % $T_я$=70 ^{0}С, $q_{кр}$=13,82 МВт/м^2, при $T_я$=90 ^{0}С, $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2.

2. Доказано, что в уравнении (2) $q_{кр}$, $\alpha_{кр}$, $T_{ст\ кр}$ зависят от $T_я$. При уменьшении $T_я$ с 90 ^{0}С до 30 ^{0}С величина $q_{кр}$, $\alpha_{кр}$, $T_{ст\ кр}$ значительно, более чем в 2 раза возрастают (рис. 3 и 4).

3. Увеличение $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_я$ способствует возрастанию $q_{кр}$. В смесях вода-этанол 20 % и вода-*n*-бутанол 10 % при достижении наибольшего температурного напора $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_я$ наблюдаться более высокое значение $q_{кр}$.

Библиографический список

1. Буров, В. Д. Тепловые электрические станции / В. Д. Буров, Е. В. Дорохов, Д. П. Елизаров. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 466 с.
2. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure / S. Nukiyama // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1984. — Vol. 27 — p. 959–970.
3. Бонилла, Ч. Вопросы теплопередачи в ядерной физике / Ч. Бонилла. — Москва : Госатомиздат, 1961. — 314 с.
4. Lykov, E. V. Thermoacoustic effects in surface boiling liquids / E.V. Lykov // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — p. 1603–1614.
5. Новиков, И. И. Переходные режимы теплообмена при кипении жидкости / И. И. Новиков // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34., № 1. — С. 162–164.
6. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part I / S. J. D. Van Stralen // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1966. — Vol. 9. — p. 995–1020.
7. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV Surface boiling/ S. J. D. Van Stralen // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1967. — Vol. 10. — p. 1485–1498.
8. Теплофизика в тепловой и ядерной энергетике / Г. Н. Кружилин [и др.]; под ред. Ю. Г. Назмеева. — Казань : Казан. фил. Моск. энерг. ин-та, 1998. — 338 с.
9. Григорьев, Л. Н. Теплоотдача при кипении бинарных смесей / Л. Н. Григорьев, А. Г. Усманов // ЖТФ. — 1958. — Т. 28, № 2. — С. 325–332.
10. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. — Москва : Издательство МЭИ, 1999. — 168 с.
11. Коллиер, Дж. Введение в ядерную энергетику / Дж. Коллиер, Дж. Хьюитт. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 253 с.

References

1. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Yelizarov, D.P. Teplovye elektricheskie stantsii. [Thermal stations.] Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009, 466 p. (in Russian).
2. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, pp. 959–970.
3. Bonilla, C. Voprosy teploperedachi v yadernoy fizike. [Issues of heat transfer in nuclear physics.] Moscow: Gosatomizdat, 1961, 314 p. (in Russian).
4. Lykov, E. V. Thermoacoustic effects in surface boiling liquids. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, vol. 15, pp. 1603–1614.
5. Novikov, I.I. Perekhodnye rezhimy teploobmena pri kipenii zhidkosti. [Transient modes of heat transfer under fluid boiling.] Teplofizika vysokikh temperatur, 1996, vol. 34, no. 1, pp. 162–164 (in Russian).
6. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part I. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1966, vol. 9, pp. 995–1020.
7. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV Surface boiling. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1967, vol. 10, pp. 1485–1498.
8. Kruzhilin, G.N., et al., Nazmeyev, Y.G., ed. Teplofizika v teplovoy i yadernoy energetike. [Thermophysics in thermal- and nuclear-power engineering.] Kazan': Kazan. fil. Mosk. energ. in-ta, 1998, 338 p. (in Russian).

9. Grigoryev, L.N., Usmanov, A.G. Teplootdacha pri kipenii binarnykh smesey. [Heat transfer under binary mixtures boiling.] Technical Physics, 1958, vol. 28, no. 2, pp. 325–332 (in Russian).

10. Alexandrov, A.A., Grigoryev, B.A. Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para. [Tables of thermophysical properties of water and steam.] Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1999, 168 p. (in Russian).

11. Collier, J., Hewitt, G. Vvedenie v yadernuyu energetiku. [Introduction to Nuclear Power.] Moscow: Energoatomizdat, 1989, 253 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.09.2014
Сдана в редакцию 16.01.2014
Запланирована в номер 28.01.2015